



光电技术系列丛书

激光测量技术概论



■ 主编 杨照金 副主编 崔东旭 纪明



国防工业出版社

National Defense Industry Press

光电技术系列丛书

激光测量技术概论

主 编 杨照金

副主编 崔东旭 纪 明

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书系统地介绍激光技术在工程测量中的应用。从激光具有的基本特性出发,介绍激光测距技术、激光多普勒测量技术、激光干涉法几何量测量技术、激光干涉法光学面形测量技术、激光测径与激光衍射测量技术、激光位移传感器、激光散射测量技术、激光共焦测量技术、激光干涉型光纤传感器、激光偏振测量技术、激光全息测量技术等。还介绍了激光自身参数的测量问题,包括激光功率能量测量、激光空域参数测量和激光时域参数测量等。

本书的读者对象为从事光电系统工程和各种物理量测量的科技工作者、光学工程专业和仪器仪表专业的硕士研究生和博士研究生。

图书在版编目(CIP)数据

激光测量技术概论/杨照金主编. —北京:国防工业出版社,2017.3

ISBN 978-7-118-11185-9

I. ①激… II. ①杨… III. ①激光测距—测量技术
IV. ①P225.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第030597号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

三河市德鑫印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 24½ 字数 605 千字
2017年3月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 92.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

《激光测量技术概论》

编审委员会

主 编 杨照金

副主编 崔东旭 纪 明

编 委 (按姓氏笔画排序)

王 雷 王生云 闫 杰 许荣国 李 刚

李 杰 李鹏程 杨 光 杨书宁 杨冶平

杨爱粉 杨鸿儒 张小卫 陈卫东 周华鹏

赵 琳 俞 兵 袁 良 解 琪

主 审 黎高平

执行编辑 段杨子 李思思

前 言

激光测量技术是以激光作为信息载体进行物理量测量的技术。由于激光具有单色性好、亮度高和方向性强的特点,从1960年激光诞生开始,人们就考虑把激光用于物理量测量。最具有代表性的是激光测距,它实现了对远距离目标的非接触测量。由此开始,激光技术应用于各种物理量测量,如采用激光干涉原理的几何量测量和光学元件面形测量。基于激光多普勒效应的速度、振动和声场测量。现在激光测量已经应用到各个方面,包括了长度、角度、位移及电、磁、声等。随着现代光电子技术的发展,激光技术结合光电探测技术、光纤传输技术和计算机技术已成为测量学领域一个重要的方面。值得注意的是,1998年,科学出版社出版了由金国藩院士和李景镇教授主编,国内知名专家参加撰写,已故两院资深院士王大珩教授作序的《激光测量学》一书,该书构建了激光测量学的学科体系,清楚地显示了激光测量学是一门与其他相关学科密切相连又相对独立的学科。

本书作者无意于介绍激光测量学的方方面面,而是试图对激光测量领域的最新技术发展和研究成果进行梳理,从介绍激光基本概念和激光独有的特性出发,介绍激光应用于各种物理量测量的理论基础、测量装置组成、测量系统的校准等。涉及了激光测距技术、激光多普勒测量技术、激光干涉法几何量测量技术、激光干涉法光学面形测量技术、激光测径与激光衍射测量技术、激光位移传感器、激光散射测量技术、激光共焦测量技术、激光干涉型光纤传感器、激光偏振测量技术、激光全息测量技术等。同时介绍了激光自身参数的测量问题,包括激光功率能量、激光空域参数和时域参数等有关的计量基准、计量标准和参数测量方法等。

本书共有14章。第1章 绪论,介绍激光技术基础知识、光导纤维的基本概念、测量学名词术语和激光测量技术的内涵等。第2章 激光测距技术,介绍激光测距的基本原理、激光测距中的关键技术、激光测距机的校准等;也介绍了激光三维扫描测量技术、激光高度计、飞秒光梳激光测距、单向激光测距、异步应答激光测距等。第3章 激光多普勒测量技术,介绍激光多普勒效应的基本概念,激光多普勒技术在测速、测振和声学测量中的应用等。第4章 激光干涉法几何量测量技术,重点介绍利用激光干涉法原理的几何量测量方法,包括精密长度测量、角度测量和速度测量等。第5章 激光干涉法光学元件面形测量技术,重点介绍利用激光

干涉原理的光学元件面形测量方法,包括平面、球面和非球面等光学元件。第6章 激光测径与激光衍射测量技术,介绍激光测径的各种方法,也介绍基于激光衍射原理的颗粒度、板材厚度等测量方法。第7章 激光位移传感器,介绍激光位移传感器的工作原理、系统组成、系统校准和激光位移传感器的应用等。第8章 激光散射测量技术,从散射的基本概念出发,介绍基于激光散射原理的大气能见度、烟雾浓度、物件表面粗糙度、颗粒度、水下目标特性测量等。第9章 激光共焦测量技术,介绍激光共焦测量原理和几种共焦检测方法在光学元件参数测量中的应用等。第10章 激光干涉型光纤传感器,介绍光纤激光干涉仪基本原理,光纤弱磁场传感器、光纤电场传感器、光纤温度传感器和光纤应变传感器等。第11章 激光偏振测量技术,介绍激光的偏振特性及其在角度、晶体生长、米散射激光雷达、硬度等方面的应用。第12章 激光全息测量技术,介绍激光全息的基本概念,基于激光全息的温度场、颗粒场、速度场和光学元件表面粗糙度测量等。第13章 激光功率能量测量技术,介绍激光功率能量的测量问题,涉及了激光计量基准、计量标准和功率能量测量方法等。第14章 激光空域和时域等参数测量,介绍激光空域特性、激光时域特性、激光波长、激光偏振特性和激光频率的测量。

本书由杨照金策划和统稿。第1章,2.1节、2.2节、2.4节~2.9节由杨爱粉、李刚撰写;2.3节由杨冶平撰写;5.1节、5.2节由王生云撰写;第7章由杨书宁撰写;9.1节、9.2节由袁良撰写;13.3节~13.5节由王雷、许荣国撰写;其余章节均由杨照金撰写。国防科技工业光学一级计量站杨鸿儒、袁良、俞兵,西安应用光学研究所科研管理处李杰,人力资源处张小卫和赵琳等提供很多帮助。黎高平研究员、王雷研究员对全书进行了认真的审阅,并提出许多中肯意见和建议。解琪、杨冶平、王生云、李刚、许荣国等负责部分插图整理。

本书采用了作者所在科研集体——国防科技工业光学一级计量站一些科研成果,也参阅和引用了国内许多专家和学者的文献。西安应用光学研究所和国防科技工业光学一级计量站领导的关心与支持使得作者能在较短的时间内完成本书。在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,不足之处在所难免,希望广大读者批评指正。

编 者

2017年1月

目 录

第1章 绪论 1

1.1 激光技术概述 1

1.1.1 受激辐射与量子跃迁 1

1.1.2 激光器的组成 2

1.1.3 激光的基本特性 5

1.1.4 常用激光器件 6

1.1.5 激光主要评价参数 9

1.1.6 激光锁模技术 10

1.1.7 激光倍频技术 11

1.2 光导纤维概述 12

1.2.1 光纤结构 13

1.2.2 光纤分类 14

1.2.3 偏振保持光纤 14

1.3 激光测量技术 14

1.3.1 测量技术 14

1.3.2 激光测量技术的内涵 15

1.3.3 测量学主要名词术语 15

1.4 误差与测量不确定度 16

1.4.1 测量误差 16

1.4.2 测量不确定度 17

参考文献 19

第2章 激光测距技术 20

2.1 激光测距原理 20

2.1.1 脉冲式激光测距 20

2.1.2 相位式激光测距 21

2.1.3 干涉法激光测距 22

2.1.4 三种测距方法性能比较 23

2.2 激光测距机的组成及

关键技术 23

2.2.1 激光发射技术 24

2.2.2 激光回波接收技术 24

2.2.3 信息处理技术 24

2.3 激光测距机的校准 25

2.3.1 最大测程校准 25

2.3.2 最小测程校准 29

2.3.3 测距精度校准 29

2.3.4 基于时间延时测距能力和 测距精度校准 30

2.3.5 光学模拟法测距能力与 测距精度校准 31

2.4 激光三维空间坐标测量技术 32

2.4.1 激光雷达测量仪 32

2.4.2 激光雷达测量仪 校准方法 33

2.5 激光高度计 35

2.5.1 激光高度计概述 35

2.5.2 激光高度计的 工作原理 36

2.5.3 激光高度计的 结构特点 38

2.6 基于飞秒激光频率梳的 绝对测距技术 39

2.6.1 飞秒光梳的原理 39

2.6.2 光谱干涉法测距 41

2.6.3 频域干涉法测距 42

2.7 异步应答激光测距技术 44

2.7.1 异步应答激光 测距原理 44

2.7.2 异步应答测距公式 45

2.8 单向激光测距技术 45

2.8.1 单向激光测距 基本概念 45

2.8.2 单向激光测距原理 46

2.8.3	空间飞行器测量端 光子接收能力	46	3.3.3	差动多普勒测振技术	69
2.8.4	单向激光测距技术的 实际应用	46	3.3.4	激光扭振测量技术	70
2.9	光子计数激光测距	48	3.3.5	纯扭振和纯弯曲振动的 激光多普勒测量	71
2.9.1	微脉冲测距方程	48	3.3.6	激光多普勒颤振 的测量	72
2.9.2	微脉冲测距系统构成和 工作过程	49	3.3.7	全光纤激光多普勒 测振仪	73
2.9.3	微脉冲激光测距 技术的应用	50	3.4	激光测振技术在声学 测量中的应用	74
2.9.4	基于光子数比较的 激光测距法	51	3.4.1	激光测振技术用于声换 能器近场全息测量	74
参考文献		53	3.4.2	激光测振技术用于 校准水听器灵敏度	75
第3章	激光多普勒测量技术	54	3.4.3	激光声纳	76
3.1	激光多普勒测量的 物理基础	54	3.5	激光测振仪校准	78
3.1.1	多普勒效应	54	3.5.1	振动校准法	79
3.1.2	激光多普勒效应	54	3.5.2	冲击校准法	79
3.1.3	光外差技术	55	3.5.3	调频信号校准法	80
3.2	激光多普勒测速技术	55	3.5.4	光频调制法校准 激光测振仪	81
3.2.1	激光多普勒测速的 光路模式	55	3.6	多普勒和偏振干涉 相结合的微位移测量	83
3.2.2	参考光模式激光固体 多普勒测速原理	57	3.6.1	基于多普勒效应和 偏振干涉的微位移 测量原理	83
3.2.3	差动型激光多普勒 固体测速的基本原理	58	3.6.2	测量装置及环境要求	84
3.2.4	激光多普勒液体 流速测量	59	3.7	激光多普勒扭矩测量技术	85
3.2.5	基于激光回馈效应的 多普勒测速	60	3.7.1	激光多普勒扭矩测量 基本原理	85
3.2.6	多普勒测风激光雷达 及其校准	62	3.7.2	激光多普勒扭矩 测量装置	87
3.2.7	双光束后向散射差动 激光多普勒测速仪	64	3.8	爆炸冲击的激光多普勒 远距离测量	87
3.2.8	激光多普勒测速仪 的标定	65	3.8.1	激光多普勒位移 测量原理	88
3.3	激光多普勒测振技术	68	3.8.2	激光多普勒爆炸冲击测量 系统的组成	89
3.3.1	多普勒测振原理	68	参考文献		89
3.3.2	激光多普勒振动仪	69			

第4章 激光干涉法几何量 测量技术 91

- 4.1 激光干涉测量几何量
的原理 91
 - 4.1.1 用于长度测量的
迈克尔逊干涉仪 91
 - 4.1.2 双频激光外差干涉法 92
 - 4.1.3 带有补偿的单频
激光干涉仪 93
 - 4.1.4 基于塞曼效应的双频
激光干涉仪 94
 - 4.1.5 基于声光频移的双频
激光干涉仪 94
 - 4.1.6 激光干涉仪的
细分技术 95
 - 4.1.7 基于迈克尔逊干涉仪的
角度测量 97
- 4.2 激光干涉仪测长精度
的校准 100
 - 4.2.1 激光测长的误差源 100
 - 4.2.2 测长精度的双光路
校准方法 101
 - 4.2.3 测长精度单光路
校准方法 101
- 4.3 基于激光干涉仪的
速度测量 102
 - 4.3.1 激光干涉测速原理 102
 - 4.3.2 流速校准车速度校准 103
- 参考文献 103

第5章 激光干涉法光学元件 面形测量技术 104

- 5.1 光的干涉基础 104
 - 5.1.1 光的波动性 104
 - 5.1.2 波动方程中各特征
量的意义 104
 - 5.1.3 干涉条纹强度分布 106
 - 5.1.4 干涉条件及其
测量保证 107

- 5.1.5 评价波面的质量指标 108
- 5.2 光学元件面形测量 109
 - 5.2.1 光学元件面形测量
装置的组成 109
 - 5.2.2 移相干涉测量原理 110
 - 5.2.3 光学元件面形
测量方法 111
 - 5.2.4 数字激光干涉仪的
计量检定 113
- 5.3 光纤点衍射干涉法光学
元件面形测量 116
 - 5.3.1 光纤点衍射干涉仪的
基本原理 116
 - 5.3.2 双光纤相移点衍射干涉仪
的基本原理 118
- 5.4 用于光学元件面形测量的
典型激光干涉仪 119
 - 5.4.1 用于激光晶体棒测量
的激光干涉仪 119
 - 5.4.2 大口径平面干涉仪 120
 - 5.4.3 移相斐索式红外
干涉仪 120
 - 5.4.4 大口径球面干涉仪 122
- 参考文献 123

第6章 激光测径与激光衍射 测量技术 124

- 6.1 扫描激光测径技术 124
 - 6.1.1 扫描激光测径仪的
工作原理 124
 - 6.1.2 激光扫描测径系统
的组成 125
- 6.2 二维扫描激光测径技术 126
 - 6.2.1 二维激光扫描测量
的原理 126
 - 6.2.2 二维扫描测径系统
的组成 127
 - 6.2.3 采用标准棒法提高
稳定性 128
- 6.3 激光衍射基本概念 128

6.3.1	光的衍射现象	128		特性的比较	146
6.3.2	衍射的主要类型	130	7.2	激光位移传感器的构成	147
6.4	激光衍射法细小测径技术	130	7.2.1	CCD 激光位移传感器	147
6.4.1	激光衍射法测径		7.2.2	对称式激光位移	
	基本原理	130		传感器	148
6.4.2	激光衍射法测径		7.3	激光位移传感器的标定	150
	系统组成	132	7.3.1	激光位移传感器	
6.4.3	测径系统标定	132		标定原理	151
6.5	激光衍射法微内径测量	133	7.3.2	激光位移传感器标定	
6.5.1	激光衍射法微内径			系统的组成	151
	测量原理	133	7.3.3	标定系统的阿贝误差	152
6.5.2	激光衍射法微内径		7.4	激光位移传感器的应用	152
	测量装置	135	7.4.1	激光位移传感器用于	
6.6	激光衍射法颗粒度			物体表面形状测量	152
	测量技术	135	7.4.2	激光位移传感器用于	
6.6.1	激光衍射法颗粒度测量			角度测量	153
	的理论基础	135	7.4.3	激光位移传感器用于	
6.6.2	激光衍射散射式测粒仪			输送带垂度测量	155
	的构造	137	7.4.4	激光位移传感器用于	
6.7	激光衍射法板材厚度			内锥形貌测量	155
	测量技术	137	7.4.5	激光位移传感器用于	
6.7.1	激光衍射法板材厚度			工件曲率测量	157
	测量原理	137		参考文献	158
6.7.2	激光衍射法板材厚度		第8章	激光散射测量技术	159
	测量装置	141	8.1	目标的散射特性概述	159
6.8	激光衍射法表面张力和		8.1.1	面散射特性	159
	表面压测量	142	8.1.2	体散射特性	160
6.8.1	基于激光衍射原理的表面		8.1.3	散射特性的表述	160
	张力测量装置	142	8.1.4	散射的分类	162
6.8.2	基于激光衍射原理的表面		8.2	激光散射式能见度测量	163
	张力测量理论分析	143	8.2.1	透射式能见度仪	163
参考文献		144	8.2.2	散射式能见度仪	164
第7章	激光位移传感器	145	8.3	激光散射式烟雾浓度测量	170
7.1	激光位移传感器工作原理	145	8.3.1	激光散射法烟雾浓度	
7.1.1	直射式三角法			测量原理	170
	测量原理	145	8.3.2	激光散射法烟雾浓度	
7.1.2	斜射式三角法			测量仪的构成	170
	测量原理	146	8.3.3	激光散射法烟雾浓度	
7.1.3	两种三角位移传感器			测量仪的标定	172

8.4	激光散射法表面粗糙度测量	173
8.4.1	散射光强一维分布的粗糙度测量方法	173
8.4.2	散射光强二维分布的粗糙度测量方法	176
8.5	激光散射式颗粒度测量	177
8.5.1	激光散射式颗粒度测量原理	177
8.5.2	激光散射式颗粒度测量装置	178
8.5.3	粒度分布求解算法	179
8.6	瑞利散射海水温度及大气密度测量	180
8.6.1	相干瑞利散射海水水下温度测量	180
8.6.2	紫外激光瑞利散射大气密度测量	181
8.7	激光散射法液体表面张力测量	183
8.7.1	液体表面的毛细波	183
8.7.2	固定频率测量波长的方法	184
8.7.3	固定波长测量频率的方法	184
8.8	基于激光散射的干涉法水下信号探测	186
8.8.1	激光干涉法水下信号探测原理	186
8.8.2	基于激光散射的干涉法水下信号探测装置	188
8.9	激光布里渊散射水下目标探测	188
8.9.1	激光布里渊散射水下目标探测原理	189
8.9.2	激光布里渊散射目标探测方法	189
8.9.3	激光布里渊散射法盐度及温度不同海水中声速测量	193
	参考文献	194

第9章	激光共焦测量技术	195
9.1	激光共焦法测量原理	195
9.1.1	共焦三维测量的理论基础	195
9.1.2	激光共焦测量原理	196
9.1.3	激光差动共焦法测量原理	197
9.2	激光共焦测量技术用于光学元件参数测量	198
9.2.1	激光共焦法曲率半径测量	198
9.2.2	差动共焦法曲率半径测量	200
9.2.3	光栅尺测长式激光差动共焦曲率半径测量	202
9.2.4	激光差动共焦法透镜中心厚度测量	204
9.3	非扫描共焦测量技术	208
9.3.1	并行共焦三维测量的基本理论	208
9.3.2	并行共焦测量系统	210
9.3.3	并行像散共焦微结构形貌检测	212
9.4	激光共焦扫描显微镜	215
9.4.1	激光共焦显微镜概述	215
9.4.2	激光共焦扫描显微镜的成像原理	215
9.4.3	激光共焦扫描显微镜的关键技术	218
9.4.4	激光干涉扫描共焦显微镜	219
9.4.5	激光扫描共焦显微镜的应用	221
	参考文献	221
第10章	激光干涉型光纤传感器	223
10.1	光纤激光干涉仪	223
10.1.1	光纤迈克尔逊干涉仪	223
10.1.2	光纤马赫-曾德尔干涉仪	223

10.1.3	相位调制与解调技术	224		的基本原理	243
10.2	光纤弱磁场传感器	224	10.7.2	迈克尔逊干涉型光纤应变传感器	244
10.2.1	光纤磁场传感器的分类	224	10.7.3	马赫-曾德尔干涉型光纤应变传感器	245
10.2.2	磁致伸缩光纤弱磁场传感系统	225	10.7.4	萨格奈克干涉型光纤应变传感器	245
10.3	激光干涉型光纤电场传感器	227	10.7.5	法布里-珀罗干涉型光纤应变传感器	246
10.3.1	电致伸缩干涉型光纤弱电场传感器	228	10.7.6	偏振态调制干涉型光纤应变传感器	247
10.3.2	压电干涉型光纤电场传感器	229	参考文献	248	
10.3.3	基于反压电效应反射式全光纤电压传感器	231	第11章	激光偏振测量技术	249
10.4	激光干涉型光纤水听器	234	11.1	激光的偏振特性概述	249
10.4.1	激光干涉型光纤水听器基本原理	234	11.1.1	偏振光学主要名词术语及定义	249
10.4.2	激光干涉型光纤水听器相位产生载波检测	235	11.1.2	偏振特性的描述	249
10.4.3	光电检测系统的输出信号	236	11.1.3	正交偏振激光	251
10.5	法布里-珀罗干涉型光纤压力传感器	236	11.2	正交偏振激光角度测量	251
10.5.1	光纤法布里-珀罗干涉型光纤压力传感器原理	236	11.2.1	基于光强差的检测	251
10.5.2	光纤法布里-珀罗干涉型光纤压力传感器的构成	238	11.2.2	基于相位差的检测	253
10.6	光纤干涉型温度传感器	238	11.2.3	基于频率差的检测	256
10.6.1	干涉型光纤温度传感器的基本原理	238	11.3	偏振-米散射激光雷达用于云层探测	258
10.6.2	马赫-曾德尔干涉型光纤温度传感器	239	11.3.1	偏振-米散射激光雷达探测原理	258
10.6.3	法布里-珀罗干涉型光纤温度传感器	241	11.3.2	偏振-米散射激光雷达结构和技术参数	259
10.6.4	嵌入式干涉型光纤温度传感器	242	11.4	激光偏振测量技术的其他应用	260
10.7	干涉型光纤应变传感器	243	11.4.1	激光偏振干涉位移测量	260
10.7.1	干涉型光纤应变传感器的基本原理	243	11.4.2	激光偏振干涉技术测量磷酸二氢钾(KDP)晶体柱面生长速率	262
			11.4.3	激光偏振干涉技术用于硬度测量	262
			11.5	偏振器件相位延迟测量	264
			11.5.1	利用 $\lambda/4$ 波片法	

测量任意波片的 相位延迟	264	成像的光纤折射率 测量	283
11.5.2 $\lambda/4$ 波片相位延 迟量测量	266	12.5.3 数字全息显微成像微光学 元件三维面形检测	285
11.5.3 多功能波片测量 装置	268	12.6 数字全息表面粗糙度检测	287
参考文献	271	12.6.1 数字全息表面粗糙度 检测原理	287
第12章 激光全息测量技术	272	12.6.2 数字全息表面粗糙度 测量装置	288
12.1 激光全息技术	272	参考文献	289
12.1.1 全息技术的产生	272	第13章 激光功率能量测量技术	290
12.1.2 全息的基本过程	272	13.1 激光参数计量基准	290
12.1.3 全息的实现	273	13.1.1 激光功率基准	290
12.1.4 全息图的特点	273	13.1.2 激光能量基准	296
12.1.5 数字全息术及其 应用	274	13.2 激光参数计量标准	298
12.2 实时数字全息测量温度场	274	13.2.1 激光功率计量标准	298
12.2.1 数字全息干涉温度场 测量原理	274	13.2.2 激光能量计量标准	302
12.2.2 数字全息干涉温度场 测量装置	275	13.2.3 脉冲激光峰值功率 计量标准	307
12.3 激光数字全息颗粒场 分布测量	276	13.3 激光功率和能量测量	310
12.3.1 数字全息测量颗粒场 理论基础	276	13.3.1 光电型激光功率 能量计	311
12.3.2 颗粒直径计算	277	13.3.2 热释电型激光功率 能量计	311
12.3.3 激光数字全息颗粒场 测量装置	278	13.3.3 光辐射计型激光功率 能量计	311
12.4 激光数字全息两相流 三维空间速度测量	279	13.3.4 体吸收型激光功率 能量计	312
12.4.1 两相流三维空间速度 测量的光学原理	279	13.3.5 量热计型激光功率 能量计	313
12.4.2 速度测量原理	280	13.3.6 流水式激光功率 能量计	314
12.4.3 两相流速度场测量 装置	281	13.4 高能激光功率与能量测量	314
12.5 数字全息微光学元件检测	281	13.4.1 烧蚀称量法	314
12.5.1 微光学元件折射率 分布与面形测量	282	13.4.2 相对式测量法	315
12.5.2 基于数字全息显微断层 成像的光纤折射率 测量	283	13.4.3 绝对式测量法	316
		13.4.4 高能激光能量计 校准	317
		13.5 激光损伤阈值测量	318

13.5.1	激光损伤阈值的 基本概念	318	14.3	激光波长测量	363
13.5.2	损伤阈值基本测量 方法	318	14.3.1	迈克尔逊干涉型波长 测量	363
13.5.3	几种典型测量装置	319	14.3.2	利用斐索干涉测量 激光波长	364
参考文献		321	14.3.3	利用法布里-珀罗干涉仪 测量激光波长	365
第14章 激光空域和时域等参数 测量技术		322	14.3.4	基于虚合成波长原理的 激光频率(波长) 测量方法	366
14.1	激光空域特性测量技术	322	14.4	激光的偏振特性测量	367
14.1.1	光束直径与发散角 测量	322	14.4.1	基于斯托克斯参量 测量的一般方法	367
14.1.2	传播因子的测量	325	14.4.2	分光棱镜型分振幅 光度式偏振测量	369
14.1.3	高能激光空域特性 测量	325	14.4.3	光栅分振幅光偏振 测量	370
14.1.4	高能激光空域特性典型 测量装置	328	14.4.4	基于液晶的激光偏振 测量	372
14.1.5	激光空域参数测量的 溯源与标定	336	14.5	激光频率测量	373
14.2	激光时域特性参数测量	337	14.5.1	基于谐波光频链的 激光频率的绝对 测量	373
14.2.1	直接测量法	337	14.5.2	基于光频间隔内分 频率链的光频绝对 测量方法	374
14.2.2	脉冲激光重复率 测量	338	14.5.3	基于光学频率梳的光频 直接绝对测量方法	374
14.2.3	纳秒、皮秒量级激光 时域特性测量	338	参考文献		377
14.2.4	飞秒脉冲测量技术	345			
14.2.5	超短激光脉冲测量 的标定	357			

第 1 章 绪 论

1.1 激光技术概述

1.1.1 受激辐射与量子跃迁

激光源于爱因斯坦 1917 年提出的物质受激辐射原理。爱因斯坦从光量子概念出发,重新推导了黑体辐射的普朗克公式,并提出了两个极为重要的概念,即受激辐射和自发辐射^[1]。

爱因斯坦从辐射与原子作用的量子观点出发,提出:相互作用应包含原子的自发辐射跃迁、受激吸收跃迁和受激辐射跃迁三个过程。考虑原子的两个能级 E_1 和 E_2 , 并有

$$E_2 - E_1 = h\nu \quad (1-1)$$

式中: ν 为辐射场的频率; h 为普朗克常量, $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 。

自发辐射:如图 1-1(a)所示,在没有任何外界作用下,激发态原子自发地从高能级 E_2 向低能级 E_1 跃迁,同时辐射出一个能量为 $h\nu$ 的光子。

受激吸收:如图 1-1(b)所示,处于低能级 E_1 的原子,在频率为 ν 的辐射场作用下,受激地向高能级 E_2 跃迁,并吸收一个能量为 $h\nu$ 的光子。

受激辐射:如图 1-1(c)所示,处于高能级 E_2 上的原子,受到能量为 $h\nu$ 的外来光子的激励,由高能级 E_2 受迫跃迁到低能级 E_1 ,同时辐射出一个与激励光子相同的光子。

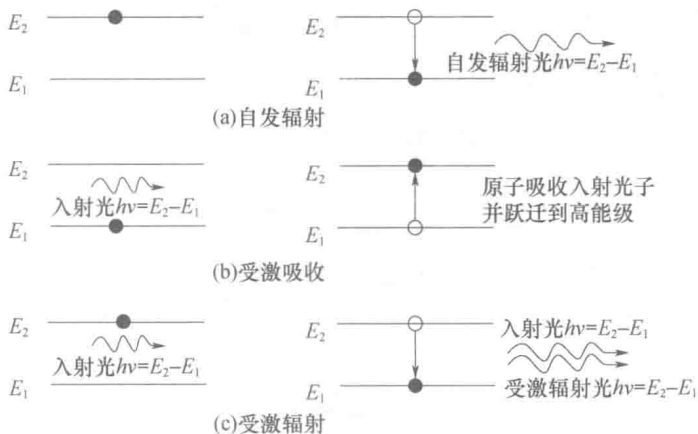


图 1-1 原子的量子跃迁

在物质处于热平衡状态时,两个能级上的原子数 n_1 和 n_2 服从玻耳兹曼统计分布:

$$\frac{n_2}{n_1} = e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}} \quad (1-2)$$

式中: T 为物质的热力学温度; k 为玻耳兹曼常数, $k = 1.38062 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 。

因 $E_2 > E_1$, 所以 $n_2 < n_1$, 即高能级粒子数恒小于低能级粒子数。当频率为 ν 的光通过物质时, 受激吸收光子数恒大于受激辐射光子数。因此, 热平衡状态下物质只能吸收光子。要实现光放大, 必须采取特殊措施, 打破原子数在热平衡状态下的玻耳兹曼分布, 使 $n_2 > n_1$ 。体系的这种状态称为粒子数反转(或“负温度”体系)。所以, 产生激光的首要条件是实现粒子数反转。

能够实现粒子数反转的介质称为激活介质。造成粒子数反转分布: 首先介质有适当的能级结构; 其次有必要的能量输入系统。供给低能态的原子以能量, 促使它们跃迁到高能态去的过程称为泵浦(也称为抽运)。

激光的形成必须经历以下三个重要环节:

(1) 粒子数反转: 激光是处于高能级的粒子向低能级跃迁而产生的。实现大量的高能级粒子向低能级跃迁, 必须通过物理或化学方法, 将绝大多数处于基态或低能级的粒子抬高到高能级状态, 也就是实现了粒子数反转。

(2) 受激辐射: 实现粒子数反转后, 在外来光的激发下, 高能级的粒子向低能级跃迁, 释放能量而产生激光。

(3) 光放大: 实现了粒子数反转的受激辐射还不能产生激光。激活介质总有一定的厚度, 自发辐射和其他众多的感应辐射总会达到并穿越介质的边界一去不返, 无法形成强的受激辐射, 介质发出的光还是普通光。因此, 必须对受激辐射进行定向增益放大。如果在激活介质两端放置两个反射镜, 沿两镜间轴向传播的受激辐射在穿越边界后, 受到反射镜的反射, 又会回到介质内部, 并感应处于激发态的粒子使其产生受激辐射, 使光得到进一步放大。如此往复, 只要镜面的反射率足够高, 则沿轴向传播的光会不断放大, 最终形成很强的受激辐射, 即形成激光。

1.1.2 激光器的组成

尽管激光器的种类繁多, 结构各异, 但其基本结构主要由激活介质、激励装置和谐振腔(全反射镜和部分反射镜构成谐振腔)三部分组成, 如图 1-2 所示。另外, 不同用途的激光器, 还需要加上不同的具有特殊用途的部件, 如调 Q 激光器要加 Q 开关、倍频激光器要加倍频晶体、锁模激光器要加锁模装置等。



图 1-2 激光器基本结构

1. 激活介质

激活介质(也称为工作物质)是能够发射激光的物质, 是激光器的核心, 必须有适当的能级结构, 可在激励源的作用下实现粒子数反转。激光器发射的激光波长主要取决于激光工作物质中激活粒子的性质。激活介质按物理性质可分为气体、固体、液体、半导体和光纤。

气体工作物质在通常条件下为气体, 种类很多, 如氩-氦混合气体、氩气、一氧化碳气体、二氧化碳气体以及各种金属蒸气等。气体工作物质一般可在许多对能级之间实现粒子数反转, 因此气体激光器不仅种类多, 而且输出的激光波长范围也极宽, 几乎遍及远紫外到远红外区。气体工作物质的光学均匀性好, 输出激光束散角一般比其他激光器的小。大多数气体激

光器既可以做连续泵浦运转,也可以做脉冲泵浦运转。气体工作物质主要采用气体放电泵浦。

固体激光工作物质是掺入少量激活离子的玻璃或晶体材料。目前能产生激光的固体工作物质有上百种,常用的有红宝石、钕玻璃和掺钕钇铝石榴石晶体($\text{Nd}:\text{YAG}$ 晶体)等。在固体激光器中,产生激光的粒子是激活离子,如红宝石中的三价铬离子 Cr^{3+} , $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 和钕玻璃中的三价钕离子 Nd^{3+} 等。固体工作物质可以加工成圆柱状、板条状或盘片状。固体工作物质主要采用光泵浦,可以在连续、脉冲、调 Q 和锁模方式下运行。

液体工作物质在通常条件下为液体,主要有螯合物、无机液体和有机染料三种。有机染料是最重要的液体工作物质,如若丹明 6G 等染料。染料激光器最重要的特点是,输出的激光波长可在一定的波长范围内连续调谐。液体激光工作物质主要采用光泵浦。

半导体激光器以半导体材料为工作物质,可以是面结型半导体材料,也可以是单晶块状半导体材料,常用的有砷化镓、铟化镓、镓铝砷等。泵浦方式有向 PN 结加正向偏压注入电流、用电子束轰击激发和光激发。

光纤激光器是用玻璃光纤作为基质,再掺入某些激活粒子做成工作物质。光纤激光器是波导式结构,可进行强泵浦,并且散热面积大,因此增益高、转换效率高、输出光束质量好、线宽窄、结构简单、可靠性高等,是发展大功率激光器的一个突出方向。光纤激光器采用的是光泵浦,有连续和脉冲两种工作模式。

2. 激励装置

激励装置(也称为泵浦装置或抽运装置),用于向激活介质提供外界能量,使激活介质实现粒子数反转。气体激光器由高压电源通过毛细管中的气体放电构成泵浦系统。固体激光器由高压充电电源、储能电容、脉冲灯、触发电路和聚光器构成泵浦系统。电源通过脉冲灯放电产生光能,光能被聚光腔会聚到激光工作物质上,将工作物质上的粒子泵浦到高能级,使其实现粒子数反转。常用的激励方式主要有光激励、放电激励、热能激励、化学激励和核能激励等。

光激励是用光照射工作物质,工作物质吸收光能后产生粒子数反转。光激励的光源可采用高效率、高强度的脉冲灯,以及太阳能和激光。大多数固体激光器是用连续或脉冲灯激励,常用的是脉冲氙灯和连续氪灯。用半导体激光二极管泵浦固体激光器是 20 世纪 90 年代激光发展的主要方向之一。由于大功率半导体激光二极管和阵列型激光二极管的迅速发展,激光二极管以体积小、质量小、效率高、性能稳定、可靠性好和寿命长等显著优点而成为目前发展最为迅速的理想泵浦光源。

气体分子在高电压下发生电离导电,这种现象称为气体放电。在放电过程中,气体分子(或原子、离子)与被电场加速的电子碰撞,吸收电子能量后跃迁到高能级,形成粒子数反转。气体放电是气体激光器常用的一种激励方法,与光激励相比,它减少了电光转换环节,激发效率较高。可采用的气体放电形式有直流、交流、射频、脉冲等多种。除气体放电外,还可用电子枪产生的高速电子泵浦工作物质,使之跃迁到高能级,称为电子束激励。半导体激光器是靠注入的电流泵浦,称为注入式泵浦。

热能激励采用高温加热方式使高能级上气体粒子数增多,然后突然降低气体温度,因高、低能级的热弛豫时间不同,可使粒子数反转。气动 CO_2 激光器是热激发的典型例子。

化学能激励是利用化学反应过程中释放的能量来激励粒子,实现粒子数反转。为产生化学反应,一般还需采用一定的引发措施,如光引发、电引发、化学引发等方式。核能激励采用核裂变反应放出的高能粒子、放射线或裂变碎片等来激励工作物质实现粒子数反转。